

PŘÍNOS PROJEKTU SKS STRUKTUROSKOPII LITIN

J. DOČEKAL¹, B. SKRBEK²

ABSTRACT: Application of cast iron castings as mass production semiproducts of parts for power transmission from engines to car wheels and rail driving units is still frequently unreplaceable. Cast irons as a "composite" of steel matrix and graphite filler. Resistance scale against thermal and mechanical stress can be shown by Eichelberg factor EF. Quantities necessary for EF determination can be measured by NDT method directly on castings or finished disks in the frame of production material quality assurance. Measurement of intended local regions of disks. Matrix evaluation methods – method of magnetic point pole. Acoustic method of graphite parameters evaluation by initial elasticity modulus E_0 determination. Calculation of R_m , $R_{p0.2}$. Vector expression of casting set structure in the $[HB; E_0]$ plane offers visually remedy to manufacturing process quality improvement – examples. TELIT system developed for these complex evaluation in the frame of program project BONATRANS F1 – IM/001.

1. ÚVOD

Součástí pohybového ústrojí, které připojují a odpojují výkon přenášený na kola náprav nebo naopak - brzdí, u silničních i kolejových vozidel mají podobné specifické požadavky na materiál a jakost. Jedná se obvykle o spojkové a brzdové kotouče (případně bubny), setrvačníky a přitlačné lamelové desky. Přenos kroutícího momentu se děje přitlačnou silou a třením kontaktních ploch. Při vzájemném pohybu těchto ploch dochází k vývinu velkého množství tepla a k smykovému napětí. Vysokou životnost zaručí pevné materiály s vysokou tepelnou vodivostí λ , malou tepelnou roztažností α a malým modulem pružnosti E . Odolnost vůči tepelným rázům specifikuje Eichelbergův faktor EF. Jeho hodnota umožňuje vzájemně porovnávat vhodnost různých technických materiálů za normálních i provozních teplot.

$$EF = R_m \times \lambda / (\alpha \times E) \quad (1)$$

Ekonomické a technické optimum materiálů pro uvedené díly tvoří grafitické litiny. Ze slitin železa mají nejvyšší hodnoty EF. Litiny tvoří „kompozit“ z nosné ocelové matrice v níž jsou vyloučeny různě orientované útvary grafitu o velikosti maximálně několik desetin mm. Vynikající tepelná vodivost grafitu působí vysoké hodnoty λ . Grafit přenáší pouze tlakové namáhání. Pevnost v tahu nemá. Proto výrazně snižuje tuhost litin (tedy hodnotu modulu pružnosti E) ve srovnání s ocelími.

Litiny při tuhnutí se nesmršťují díky „grafitickému„ růstu. Proto na rozdíl od ocelí, slitin Al, Cu umožňují odlévat podstatně homogennější odlitky kotoučů brzd a spojek.

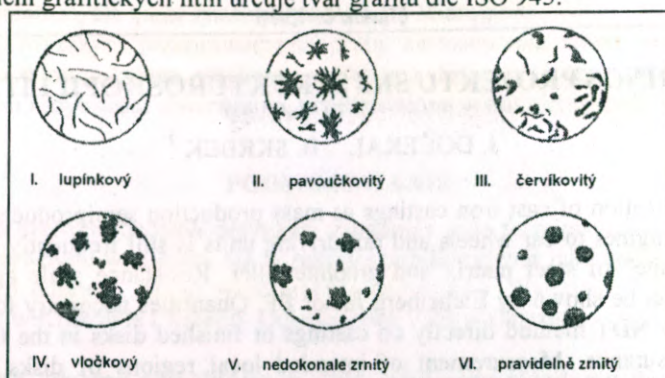
Vysoké hodnoty pevnosti ve smyku $\tau_s = 0,9 \times R_m$ se docílí stabilní pevnou maticí – obvykle perlitickou.. Vyloučení feritu není přípustné. Tvar grafitu a konečnou skladbu matrice určuje slévárenská metalurgie. Reprodukovatelnost procesu slévárenské metalurgie citlivě ovlivňuje skladba surovin, procesní teploty a časy. K záruce jakosti litinového odlitku s úzkými tolerancemi mechanických vlastností a homogenity proto nezbytně patří účinná kontrolní činnost. Její účinnost spočívá v kontrole přímo na odlitku bez jeho porušení, v rychlosti (nebrzdí výrobní tok), která umožní operativní nápravu případných odchylek vlastností od předpisu technických podmínek.

¹ Ing. Jan Dočekal - Technická Univerzita v Liberci, katedra materiálu, Liberec, ČR

² doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc. - Technická Univerzita v Liberci, katedra materiálu, Liberec, ČR

2. LITINY

Základní rozdělení grafitických litin určuje tvar grafitu dle ISO 945.



Obr.1. Normalizované tvary grafitu litin: Ilupinkový, II.....pavoučkový, III....červíkový, IV...vločkový, V....zrnitý, VI...kuličkový – pravidelně zrnitý.

Standardně se používá litina s lupinkovým grafitem (LLG) jakosti GJL-250 nebo český ekvivalent ČSN 42 2425. V deskách (tloušťka L 30mm) brzdových a spojkových kotoučů odlévaných v SKS Krnov dosahuje hodnot vlastností podle tab.1. Litina se taví v kuplovnách. Cíl programového projektu BONATRANS vyplývá z jeho názvu „Výzkum technologie výroby odlitků z litiny s kuličkovým grafitem modifikací ve slévárenské formě“. Litina s kuličkovým grafitem se vyrobí z litiny s lupinkovým grafitem modifikací Mg. Hořčík výrazně zvyšuje povrchové napětí tekuté litiny. Nutí tím růst grafitu v kulovitých útvarech (GVI) a ne v lupíncích. Před modifikací je však nutno v litině snížit obsah síry pod 0,02%. Jinak by se vázal Mg na S a modifikace by nenastala.

Obsah S se řádově snižuje pomocí aktivní strusky (dmycháním O_2) a do tekuté litiny kontinuálně zaváděným plněným (odsířovacím činidlem) profilem. Aplikována INMOLD modifikace (reakční komůrka ve slévárenské formě). Porovnání vlastností zmíněných litin – tab.1.

EN	ČSN	R_m MPa	A_5 %	R_d MPa	α $\mu m/m.K$	$\lambda W/K.m$	E_0 GPa	EF
GJL-250	42 2425	>250	0,3-0,8	600	11.7	46.5	125	7.95
GJS-600	42 2306	>600	>3	870	12.5	31.1	174	8.58

Hodnoty uvedených vlastností citlivě reagují na změny v metalurgickém procesu výroby kotoučů. Kumulace méně příznivých (ale ještě tolerantních) změn teplot, režimu času či chemické skladby již může vyvodit nepřijatelné odchylky užitečných vlastností odlitku. Proto součástí projektu byl vývoj a realizace kontrolních nedestruktivních strukturoskopických metod pro pokrytí plánované 100% produkce kotoučů.

3. NEDESTRUKTIVNÍ MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ LITIN

Obor nedestruktivního zkoušení (NDT) má vlastní organizační strukturu v jednotlivých státech. Pevný řád kvalifikace pracovníků (EN 473) způsobilých provádět zkoušení, jednoznačnou terminologii, požadavky na certifikaci měřicí techniky a způsobilost zkušebních pracovišť i laboratoří v jednotlivých zkušebních metodách předepisuje na 114 státních norem [1]. V souvislosti se vstupem do EU probíhá nyní intenzivní normalizační přizpůsobování, takže většina norem má označení ČSN EN (ISO) s tří až pětímístným číslem. Původní a pro nás ještě přehledná struktura šestičíslicí ČSN se uvádí jenom jako doplňkové orientační označení. Je však nesmírně důležitá, neboť tvoří přehlednou strukturu, v které se může technik spolehlivě orientovat, na rozdíl od náhodného systému značení čísel norem EN, ISO. Během posledních tří let stouplo množství přijatých EN norem ze 114 na 182.

Těchto 182 norem ošetřuje následující metody zkoušení (tučně tvoří mezinárodní označení):

MT – magnetická prášková

RT – radiografické

PT – kapilární

VT – vizuální

ET – vířivých proudů

UT – ultrazvukem.

LT – hledání těsnosti

AE – akustická emise.

Jejich většina má obecný charakter nebo se zabývá zkoušení ocelových svarů, trub, tlakových nádob, tyčí a výkovek. Zkoušení odlitků nedestruktivními postupy má v názvu 18 norem, tedy asi 10%. Oborová činnost nedestruktivního testování se všemi normami zabývá klasickou defektoskopií, tedy technikami hledání a prezentací vad spojitosti kontinua. Ve slévárenství se pevně uplatňují a předmětem přejímacích podmínek jsou metody RT a UT pro vnitřní vady a MT s PT pro povrchové vady.

Nedestruktivní strukturoskopie z uvedeného pohledu norem zůstává stranou, bez sjednocujícího prvku. Je předmětem vývoje. Ve specifických případech, zejména ve slévárenství litin však její význam pro výrobu kvalitního finálního odlitku převažuje nad defektoskopií. Strukturoskopie kvantifikuje vztah mezi fyzikální nedestruktivně měřenou měřenou veličinou a mechanickou vlastností, metalografickým parametrem struktury nebo napětím (mechanickým).

3.1. ULTRAZVUKOVÉ METODY

Prostupnost akustických vln materiálem klesá s útlumem hmoty matrice a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Za nespojitost lze považovat inkluze se značně odlišným vlnovým odporem Z vůči matici [2]

$$Z = c \times \rho \quad [\text{MPa/s}] \quad (2)$$

Čím větší je rozdíl akustických odporů Z_m a Z_g , tím větší je množství odraženého tlaku akustické vlny z rozhraní zpět

$$R = (Z_g - Z_m) / (Z_g + Z_m) \quad (3)$$

Pro ocelovou matici litiny platí

$$Z_m = 5,92 \times 7,2 = 46,2 \text{ MPa/s}$$

Pro grafit přibližně platí

$$Z_g = 2 \times 2 = 4 \text{ MPa/s}$$

Rozhraní matrice - grafit odrazí $R = 80,5\%$ tlaku akustické vlny. Přímé šíření akustické vlny litinou je po několika odrazech od útvarů grafitu vyčerpáno a rozptýleno. Velikost dráhy akustické vlny maticí pak závisí na labyrintu grafitických útvarů. Čím více útvary matici oslabují (čím jsou štihlejší), tím větší je hodnota akustické dráhy L_u ve srovnání s přímou dráhou (tloušťkou prozvučované stěny) L . Rychlost zvuku c_L tak klesá.

$$c_L = c_{L0} \times L / L_u = 5920 \times L / L_u \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

c_{L0} ... rychlost zvuku ocelové matrice litiny.

Pokud dochází v rychleji ochlazované části odlitku k metastabilní krystalizaci eutektika (to znamená, že uhlík na místo vyloučení jako grafit se váže na železo ve formě karbidu Fe_3C a vylučuje se jako tvrdý ledeburit.) existuje v šíření akustické vlny odlitkem méně překážek a tudíž hodnota rychlosti zvuku s rostoucím množstvím ledeburitu ve struktuře roste.

Útlum amplitudy akustických kmitů α výrazně roste pokud délka vlny λ se blíží velikosti útvarů i grafitu

$$\alpha = k_\alpha \times 1 \times (c_L \lambda)^2 \quad [\text{dB/mm}] \quad (5)$$

Hodnota $\alpha = 0,05$ pro oceli umožňuje prozvučovat i metrové tloušťky stěn. Grafit výrazně útlum zvyšuje. Pro LLG dosahuje hodnot řádově vyšších, což velmi omezuje detekci vad. Většinu odlitků lze charakterizovat vlastní rezonanční f_r , která je funkcí modulu pružnosti E (popisuje tvar grafitu),

měrné hmotnosti (množství grafitu) a geometrické štíhlosti H/D . Frekvence f_r nalézá obvykle ve slyšitelném rozsahu

$$f_r = k_f \times (E/\rho)^{0.5} \times D/H^2 \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

Hodnota E závisí přímo na velikosti rychlosti zvuku c_L a tedy na tvaru a množství grafitu.

$$c_L = \{(E/\rho) \times (1 - \mu) / [(1 + \mu) \times (1 - 2 \times \mu)]\}^{0.5} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

Úpravou (6) lze získat zjednodušený výraz kde L je skutečná síla stěn a L_u měř. ultrazvukem

$$E = (K \times L/L_u)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

3.2. IMPULSNÍ MAGNETICKÁ METODA

Zaměřuje se na lokální měření zbytkového magnetizmu H_m s balistickým (impulzním) způsobem magnetizace [3]. V oceli se stejně magneticky orientované atomy soustřeďují v doménách, které tvoří jakési subzrna v zrnech struktury. Polarizací vnějším magnetickým polem dochází k růstu domén posunem tzv. Blochových zón a polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky (zdroj Barkhausenova šumu). Po zániku vnějšího magnetického pole H_o se nevrátí všechny domény do původního stavu. Vzniká remanentní polarizace I_r . Zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r . Vratným změnám brání atomy feromagnetika vázané v molekulách a atomární. napětí, mřížkové poruchy. Proto složky struktury, které obsahují karbid železitý, martenzit, četné dislokace a hranice zrn vykazují vysokou hodnotu remanentní polarizace I_r .

$$H_r = H_o - N \times I_r / \mu \quad [\text{A/m}] \quad (9)$$

Demagnetizační činitel N charakterizuje vnější i strukturní geometrické poměry rozhraní feromagnetika.

Na zkoušené místo výrobku působí impulzní magnetické pole o intenzitě H_o . Tvar proudového impulsu vedený do příložené silové cívky, případně přesně definovaný jejich sled definuje tok parazitních vířivých proudů (mohou se vhodně využít k potlačení negativních vlivů N) a strukturně selektivní citlivost metody. Metody používané v Rusku a České republice se právě zásadně odlišují v charakteristikách magnetizace a tím i v cíli aplikací. Snímačem H_r může být Hallova nebo Försterova sonda. Příspěvek dH_r jednotlivých zrn feromagnetika na výsledné hodnotě H_r závisí na stínícím účinku m a jejich vzdálenosti t od snímače

$$H_r = \sum m \times t_i \times dH_{ri} \quad (10)$$

S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r . V praxi do $t=12\text{mm}$. V tenkých stěnách se tak energie pulzu soustředí do menšího objemu zrn. Hodnota H_r do hodnoty t roste podle experimentálně stanoveného modelu.

$$H_{rL} = H_r L^{12 \times (81 \times L - 3 + 1)} \quad (11)$$

Slitiny železa (oceli a litiny) tvoří spektrum nejrozšířenějších konstrukčních materiálů. Feromagnetické vlastnosti lze přiřadit jejich drtivé většině. Znalost hodnot mechanických vlastností v kriticky namáhaném místě u exponovaných dílů převládá nad potřebou integrální informace o vybrané mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů má lokální magnetická strukturoskopie významné postavení v spektru ostatních metod. Aplikaci rozšíření našla ve formě impulzní magnetické kontroly hlavně v Rusku a Čechách.

Charakterizuje ji vysoká produktivita kontroly s cílenou dostatečnou citlivostí ke kontrolovanému strukturnímu parametru. V západní Evropě se pro tuto oblast materiálů využívá výhradně metod ET. Střídavé vířivé proudy však popisují více povrchové partie součástí. Pro výrobky ve formě tvářených polotvarů a odlitků s neupravenými povrchy se lépe hodí lokální magnetická strukturoskopie.

4 STRUKTUROSKOPIE KOTOUČŮ BONATRANS

Kapitola využívá poznatků interní zprávy [4].

Cílem kontrolních operací je zabezpečit expedici kotoučů a háků s mechanickými vlastnostmi v předepsaných tolerancích. Mezní hodnoty HB, R_m , R_p , A důležité pro uvolnění odlitků k expedici stanovují technické předpisy TP 22 -112 - 04.

V letech 2005 a 6 v rámci kampaní vývojových taveb byly odlity desítky zkušebních kotoučů Y2 bloků a plochých vzorků o pestré škále struktur. Po nedestruktivním měření se stanovily destruktivně mechanické vlastnosti a metalografie. Regresní analýzou nedestruktivně a destruktivně naměřených dat byly určeny matematické modely do paměti přístrojů DOMENA a TELIT.

4.1 MAGNETICKÁ STRUKTUROSKOPIE – DOMENA B3

Cílem výzkumu bylo stanovit lineární rovnice (konstanty A, B) pro výpočet mechanických vlastností zadávané do paměti DOMENA B3 (obr.2) před měřením. Optimální režim nastaven na magnetizaci M4 či M5. Během řešení projektu bylo vyvinuto úsilí o zlepšení reprodukovatelnosti měření po opakovaném měření a měření při nízkých a vysokých teplotách ($\pm 30^\circ\text{C}$). Na základě výsledků měření stability výrobce DOMEN B3 (ELKOSO s.r.o. Brno) provedl technické úpravy k lepší stabilitě provozu. Obecně:

$$HB = A \times M + B \quad (12)$$

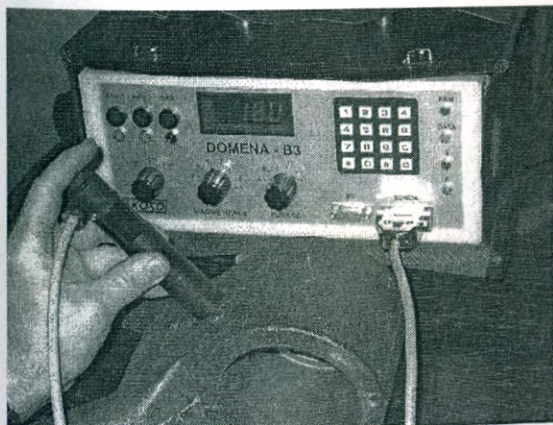
Měření tvrdosti na odlitkách a kotoučích z LLG.

$$HB = 0,6 \times M + 100 \quad (13)$$

Měření mechanických vlastností na kotoučích z LKG.

Δ ...střední ověřená chyba měření. Tab.7

Vlastnost	rovnice	Δ	K	K^2	Č.r.
HB	$0,8 \times M + 128$	10	0,958	0,918	(14)
F %	$116 - 0,585 \times M$	10	-0,932	0,868	(15)
R_m MPa	$2,69 \times M + 383$	26	0,955	0,912	(16)
$R_{p0,2}$	$1,81 \times M + 242$	32	0,931	0,867	(17)
A %	$22,4 - 0,09 \times M$	2	-0,89	0,787	(18)



Měření R_m , R_p , A je podmíněno dostatečně vysokou hodnotou modulu pružnosti E_0 nad 160Gpa, která zaručuje vysoký podíl kuličkového grafitu ve struktuře. Tu nutno předem změřit univerzálním defektoskopem USN35. Tento postup kontroly je náhradní měření za TELIT.

Obr.2. DOMENA B3

4.2. TUHOST EO LITIN

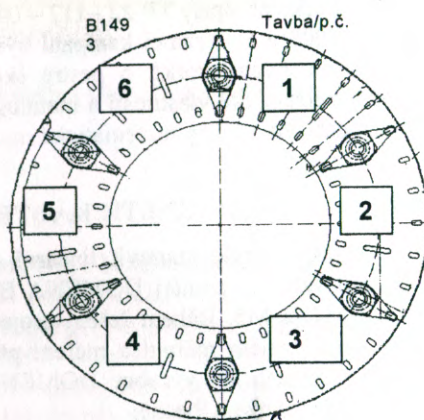
Vzorce slouží pro obecnou práci s USN35 i pro vkládání do paměti TELIT před měřením. Podle hodnoty E_0 lze jednoznačně určit jakostní třídu LLG pro určitou tloušťku stěn.

Pro litinu s lupinkovým grafitem SKS používanou dosud na kotouče BONATRANS platí:

$$E_o = (446,1 \times L/L_u)^2 \quad [\text{Mpa}] \quad (19)$$

Mezní hodnoty obsahuje tabulka 8 ve zprávě [4]. Pro kotouče platí:

Jakost ČSN	E _o GPa	V _L m/s	L/L _u
Dolní mez	97	4133	0,6982
42 2420	102,2	4242	0,7166
Rozhraní 20/25	111,1	4423	0,7472
42 2425	120	4597	0,7765
Rozhraní 25/30	126	4711	0,7957
42 2430	132	4821	0,8144



Hodnoty L/L_u slouží pro operativní rychlou kontrolu.

Obr.3. Místa měření na desce (L=30mm)
kotouče B1493

Litina s kuličkovým grafitem:

$$E_o = (432,57 \times L/L_u)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (20)$$

Průměrná tuhost kotoučů BONATRANS (obr.3) E_o = 171,7GPa.

Ve slévárenské praxi pánvových modifikačních postupů obvykle stačí měřit L/L_u prvního a posledního odlitku litého z dávky modifikované litiny pánve. V SKS vyvinutá INMOLD modifikace vyžaduje prověřovat účinnost modifikace každého odlitku z formy.

Mezní hodnoty rychlosti zvuku v_L respektive jen poměru L/L_u s ohledem na mezní hodnoty dle EN pro rychlý odhad dostatečné nodularity LKG platí tab.9.

Jakost LKG ČSN	E _o GPa	V _L m/s	L/L _u
42 2304,5	160	5475	0,9247
42 2306,7	170	5642	0,9532

Normy EN v přiřazování hodnot E_o nejsou jednoznačné. Hodnota 160GPa odpovídá již 25-35% podílu červíkového GIII na úkor kuličkového GVI grafitu ve struktuře litiny. Přísné TP 22-112-04 vyžadují dodržovat mezní hodnotu 170GPa.

4.3. KONTROLA UŽITNÝM VZOREM TELIT

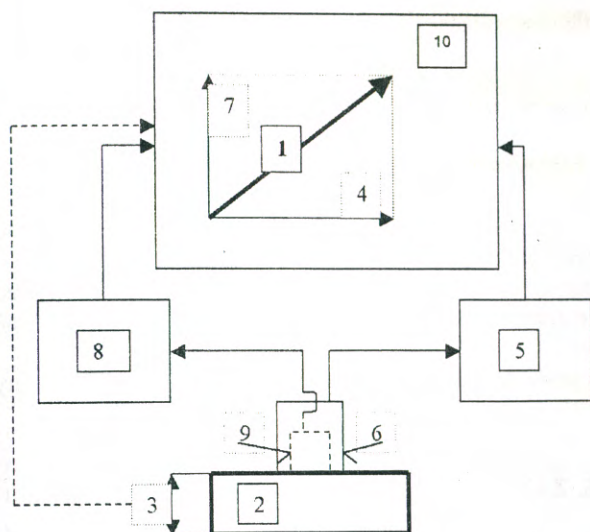
Zařízení pro nedestruktivní stanovení kvality materiálu pod typovým označením TELIT, které je výsledkem vývoje v rámci projektu F1-1M/01, podle užitého vzoru CZ17380 (obr.4) měří vstupní veličiny M, L, L_u. Matematickými modely ve tvarech

$$HB = A \times M + B \quad (21)$$

$$E_o = (K \times L/L_u)^2 \quad (22)$$

$$Y = C \times (L/L_u) D \times ME \quad (23)$$

Pak HB, E_o, Y kde Y je R_m pevnost, R_p mez kluzu a A tažnost.



Obr.4. TELIT: 1... vektor struktury, 2... kotouč, 3... tloušťka kotouče, 4... tuhost litiny, 5... impulzní magnetický tvrdoměr, 6... magnetický snímač, 7... složka, (tvrdost) matrice litiny, 8... ultrazvukový tloušťkoměr, 9... ultrazvuková sonda, 10... sdrůžovací jednotka (PDA).

Pro odlitky z LLG platí:

$$HB = 0,6 \times M + 100 \quad (24)$$

$$E_o = (446,1 \times L / Lu)^2 \quad (25)$$

$$R_m = 7,211 \times (L / Lu)^2, 278 \times HB, 75 \quad (26)$$

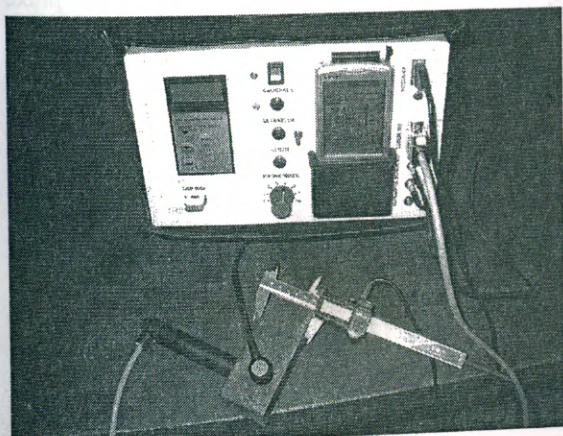
Pro kotouče z LKG:

$$R_m = 8,54 \times (L / Lu)^{5,257} \times HB, 86 \quad (27)$$

$$R_p = 9,3 \times (L / Lu)^3 \times HB, 756 \quad (28)$$

$$A = 132000 \times (L / Lu)^{13} \times HB - 1,635 \quad (29)$$

Ověřená střední chyba R_m , R_p , A do 10%.



Obr. 5. TELIT se snímači na zkušební desce.

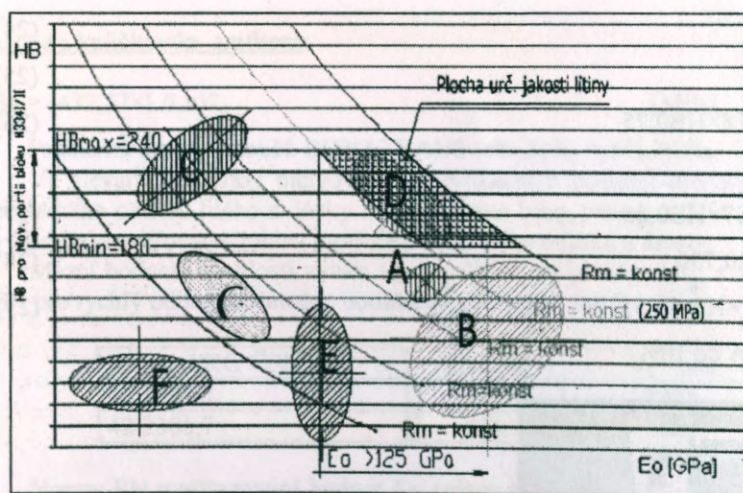
4.4. VYJÁDŘENÍ STRUKTURNÍHO VEKTORU V SÍTI IZOPEVNOSTNÍCH ČAR

Grafické vyjádření výsledků měření (obr.6) kombinovaným strukturoskopem TELIT (obr.5) na ucelených souborech odlitků přináší poznatky o jejich metalurgické minulosti a možnosti operativních zásahů k nápravě kvality (zmenšení odchylek R_m , HB , E_o). Popis souvislostí tvarů vektorových množin:

- A. nízký rozptyl mechanických vlastností a struktury. Směrodatná odchylka takového souboru je poměrně nízká.
- B. – velký rozptyl vlastností. Směrodatná odchylka má velmi vysokou hodnotu.
- C. – velký rozptyl pevnosti R_m . Toto je velmi nepříznivý tvar množiny jejíž tvar je kolmý na čáry stejné pevnosti.
- D. – malý rozptyl pevnosti i při vyšších rozptylech tvrdosti HB a E_o . Množina bodů poskládána rovnoběžně s izopevnostními křivkami.
- E. – velký rozptyl vlastností kovové matrice litiny. Vzniká ve výrobní fázi tepelného zpracování (žhánění) nebo při vytloukání odlitků z forem v oblasti eutektoidní přeměny.
- F. – velký rozptyl tvaru a množství grafitu vzniká ve fázi metalurgické přípravy kovu před litím nebo při eutektické přeměně ve formě. Základní kovová matrice odlitků je přibližně stejná.
- G. – malá směrodatná odchylka R_m i při vyšší odchylce HB a E_o – nejprůběžnější „tvar“ množiny vektorů.

5. ZÁVĚR

Průměrný takt kontroly magnetickým tvrdoměrem DOMENA B3 je 3-5s a kombinovaným strukturoskopem TELIT 5-20s (podle paralelního nebo sériového režimu měření snímačů). Vypočítané matematické modely umožní měřit mechanické vlastnosti s vyhovující přesností. Řešení



oblasti nedestruktivní kontroly struktury projektu F-1M/01 zabezpečí 100% kontrolu produkce vyvinutých (z LKG) i stávajících kotoučů BONATRANS. Řada dílčích poznatků i překročila rámec zadání. Důležité bude jejich osvojení nositelem projektu a rozšíření do průmyslové praxe ostatních sléváren.

Obr.6.

Příspěvek vznikl za podpory programového projektu F-1M/01, výzkumného záměru MSM4674788501 a projektu cíleného výzkumu AVČR IQS100100508.

LITERATURA:

- [1] DVOŘÁK, J.: Nedestruktivní zkoušení – platné ČSN k 31.12.2004. NDT Welding BULLETIN, II/2004, s.59-64, ISSN1213-3825.
- [2] Deutsch, Platte, Vogt. Ultraschallprüfung: Grundlage industrielle Anwendungen. Springer Verlag Berlin 1997, ISBN 3-540-62072.9.
- [3] SKRBEK, B.: Impulzní magnetická kontrola výrobků z ocelí. NDT Welding BULLETIN, III/2001, s.47-52, ISSN1213-3825.
- [4] SKRBEK, B.: Výběr a zpracování dat experimentálně změřených v SKS v kampaních r.2006. Interní zpráva 75-40SKS projektu F1-1M/01, SKS Krnov 2007, 24 s.